

論文

[2083] 途中定着部を有する既設鉄筋コンクリート部材のシート状連続炭素繊維によるせん断補強効果

によるせん断補強効果

宇治公隆*1・山口隆裕*2・池田尚治*3

1. はじめに

昭和53年の宮城県沖地震により一部の橋脚にせん断ひびわれが生じたことから、昭和55年制定のコンクリート標準示方書は鉄筋の途中定着についてモーメントシフトの考え方により定着長を伸ばすように改訂された。それにより、昭和55年以降に設計された構造物は十分な靱性を確保できるようになったと考えられる。しかし一方で、昭和55年以前に構築された構造物の中には、大規模な地震が発生した場合にせん断破壊を生じる危険性を有するものが存在すると推測できる。

そこで本研究においては、途中定着部を有する梁・柱等の既設鉄筋コンクリート部材におけるせん断耐荷性能の向上を目的とするシート状連続炭素繊維（以下、CFS（Carbon Fiber Sheet）と記す）の補強効果について検討した。本実験では、途中定着部の曲げせん断ひびわれの発生およびそれに起因するせん断破壊の抑制効果を把握するとともに、途中定着部の連続鉄筋の応力度特性ならびにCFSによる鉄筋応力度の低減効果について検討した。

2. 実験概要

2.1 実験方法

(1) 供試体

供試体は表-1に示す3体であり、鉄筋が引張部定着されている場合のCFSによる軸方向補強あるいはフープ方向補強の効果について検討した。コンクリート部材は形状・寸法、配筋状況を含め3体とも同一とし、図-1に示すごとく途中定着部の影響が明確となるように定着余長（モーメントシフト+定着長）を考慮せず、せん断スパン中央部で軸方向鉄筋量を1/2とした。

使用したCFSは1㎡当り重量で175g(175g/㎡)の連続炭素繊維が一方に配列されてシート状を成しており、比重を1.8とした場合の見掛けの厚さ(CF換算厚さ)は0.0097cmである。なお、計算から求まるCF換算厚さを確保するのに2層のCFSが必要と判断されたものについては積層状に重ねて貼付けた。CFSおよび鉄筋の材料特性を表-2に示す。コンクリートは粗骨材最大寸法20mmの普通コンクリートで、実験時における圧縮強度は255 kgf/cm²であった。

(2) CFSによる補強

供試体No. 2は、CFSを供試体下面にエポキシ樹脂で軸方向に貼付けた。貼付け量および

表-1 供試体の要因

| No. | 補強方法 |
|-----|--------------|
| 1 | - |
| 2 | 供試体下面に軸方向貼付け |
| 3 | 供試体にフープ状に巻付け |

表-2 使用材料

| 材料 | 性質 |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| シート状連続炭素繊維 (CFS) | 引張強度 $f_u = 27,000 \text{ kgf/cm}^2$ 弾性係数 $E = 2.35 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ |
| 鉄筋 (SD295, D13) | 軸方向鉄筋 降伏応力度 $f_y = 3,400 \text{ kgf/cm}^2$ 引張強度 $f_u = 4,900 \text{ kgf/cm}^2$ |
| | スターラップ (SD345, D6) 降伏応力度 $f_y = 4,000 \text{ kgf/cm}^2$ 引張強度 $f_u = 5,400 \text{ kgf/cm}^2$ |

*1 横浜国立大学大学院 博士課程後期 [大成建設(株)勤務] (正会員)

*2 横浜国立大学助手 工学部建設学科 (正会員)

*3 横浜国立大学教授 工学部建設学科、工博 (正会員)

範囲は以下のように考えた。すなわち、山本ら[1]は途中定着鉄筋と連続鉄筋のひずみが同程度となる位置を定着端部から20φ程度としており、本実験では安全側の考え方に立ち、端部から10φ（φ = 1.3cm）までは全く付着が作用しないものとした。そして、鉄筋応力分布は10φから20φの間で直線的に変化するものと仮定し、連続鉄筋が降伏しないようにCFSを配置した。その結果、連続鉄筋が降伏しないために10φ位置でCFSが受持たなければならない引張力は $T = 2240\text{kgf}$ となる。1層のCFSの1cm幅当りの最大引張力は計算上 262kgf/cm であり、供試体幅20cmでは最大 5240kgf の引張力を受持つことができることからCFSを1層配置した。また、付着応力度を 13kgf/cm^2 [2]と仮定して必要な付着長さを計算すると9cmとなる。ただし、途中定着部の曲げひびわれがせん断ひびわれに進展した場合、斜めひびわれの角度を 35° [2]と仮定すれば途中定着部より14cm外側が斜めひびわれの下端となる。したがって、この位置より9cm支点側に付着長さを確保することとし、途中定着部から支点側23cmを貼付け長さとした。また、荷重点側については10φ位置（13cm）

から必要な付着長さ9cmを確保し22cmを貼付け長さとした。CFSの配置状況を図-2に示す。

CFSをフープ状に巻付けた供試体No. 3は、コンクリートに配置したスターラップと同程度の補強を行い、せん断補強が2倍となるようにした。CFSが有効に作用する応力度を引張強さ（ $f_u = 27000\text{kgf/cm}^2$ ）の35%[2]とすると、CFSを2層に巻付けることによりスターラップと同等のせん断力を受持つことができる。CFSの巻付け範囲は斜めひびわれが発生すると考えられる範囲とし、途中定着部より支点側、荷重点ともに14cmとした。なお、CFSの巻付けに先立ち、断面のカド部は半径30mmの曲面となるように成形した。CFSの配置状況を図-2に示す。

(3) 荷重方法

荷重は図-1に示すごとく2点集中荷重とし、鉄筋の応力度が $f_s = 1800\text{kgf/cm}^2$ となる荷重および降伏荷重に対して荷重制御で繰返しを行い、その後変位制御により1.5, 2, 2.5, 3, 4 δy

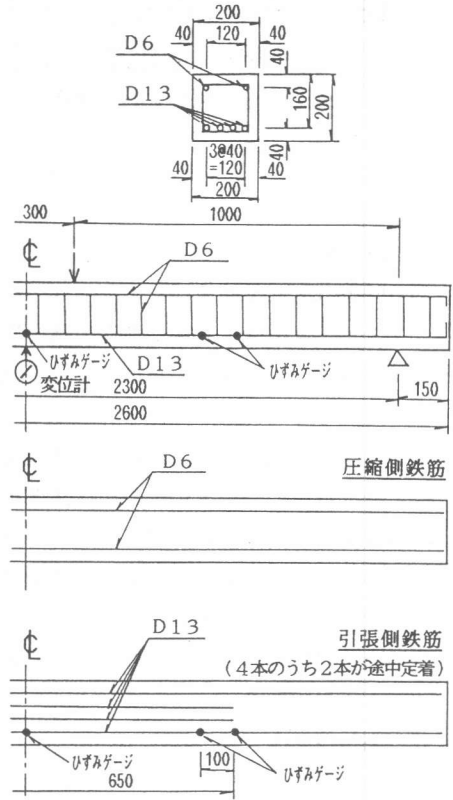


図-1 供試体の形状寸法および配筋状況

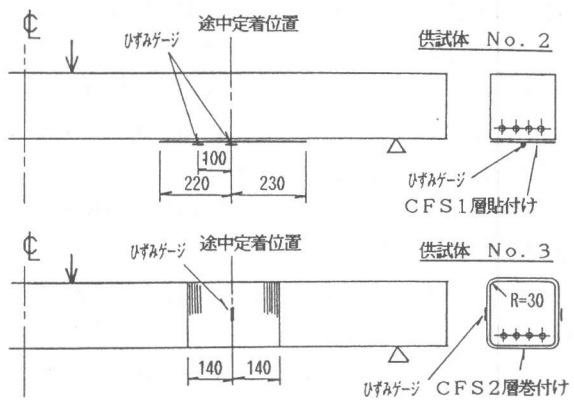


図-2 CFSによる補強方法

(δy : 降伏変位)で繰返しを行った。なお、本実験では载荷した2点の载荷力の和を作用荷重(P)とした。ひずみ、変位の測定位置を図-1, 2に示す。

2.2 実験結果

(1) 荷重・変位曲線

各供試体の荷重・変位の包絡線を図-3に示す。供試体No. 1は変位(δ)が11mmの時に斜めひびわれの発生により荷重の低下が見られたが、その後も荷重が漸増傾向を示し $\delta=28$ mmであらに斜めひびわれが発生してせん断破壊した。ところで、本実験においてはスターラップとしてD6筋を土木学会コンクリート標準示方書で規定する最大間隔: $1/2 \cdot d$ (d ; 有効高さ)で配置したが、計算の結果、スターラップのみでも十分なせん断耐力を有している。したがって、実験結果に示されるようにせん断破壊したものの比較的靱性のある破壊挙動を示したものと考えられる。供試体No. 2は曲げひびわれのみ発生し、 $\delta=30$ mmで曲げ引張破壊を生じた。供試体No. 3は $\delta=12$ mmおよび $\delta=20$ mmで荷重の低下が見られた。この時点において、フープ方向に巻付けたCF S部では繊維方向のひびわれが認められており、これが斜めひびわれの発生時点に対応しているものと考えられる。なおNo. 3

もスパン中央部における曲げ引張破壊であったが、途中定着部での斜めひびわれの発生により、供試体中央の変位はNo. 2よりも大きな値を示している。

(2) ひびわれ発生状況

ひびわれ発生状況を図-4に示す。なお、ひびわれの傾向は各供試体とも左右でほぼ同じと判断されたため、片側のひびわれ状況のみを示している。供試体No. 1は $P=4.6$ tf ($\delta=10$ mm)でスパン中央部および途中定着部がほぼ同時に降伏した後、目視の観察では $\delta=13$ mmにおいて途中定着部を起点とする斜めひびわれが認められた。これに対し供試体No. 2は終局まで斜めひびわれの発生は見られな

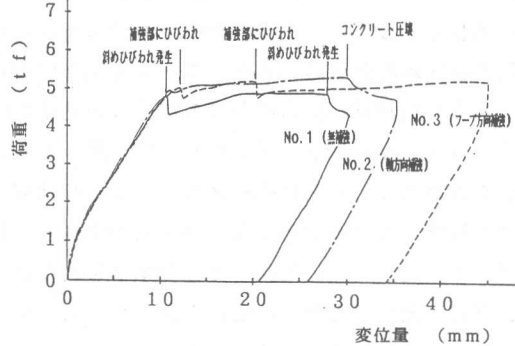
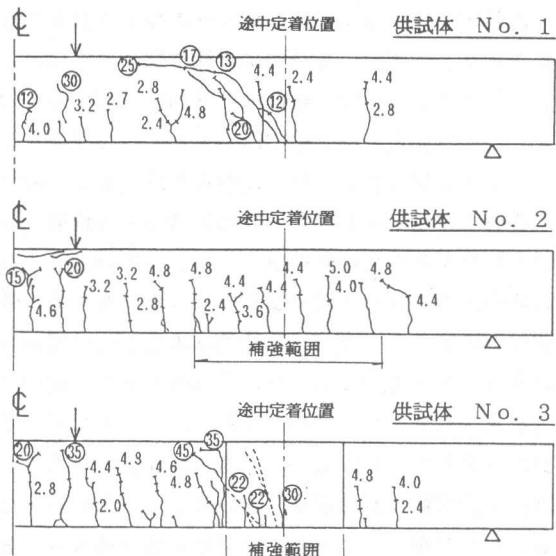


図-3 荷重・変位の包絡線



注) 数字は荷重を、丸数字は変位を示す。

No. 3の破線は試験終了後にCF Sを剥がして観察したひびわれ。

図-4 ひびわれ発生状況

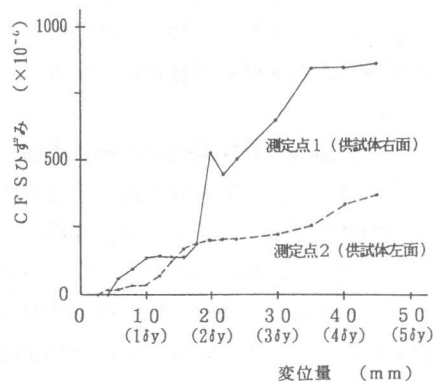


図-5 CF Sのひずみ変化

かった。また供試体No. 3は試験終了後にCFSを剥がして観察した結果、途中定着部を起点とする斜めひびわれが認められた。フープ方向に配置したCFSの定着端部位置におけるひずみの変化を図-5に示す。 $\delta = 10\text{mm} (= 1\delta y)$ 程度以降、CFSのひずみが増加しており供試体No. 1とほぼ同じ段階で斜めひびわれが生じたものと推測できる。したがって、フープ状に巻付けて補強する場合には斜めひびわれ発生後のせん断抵抗を期待することになる。

(3) 連続鉄筋のひずみ分布

連続鉄筋のひずみ分布を図-6に示す。なお、途中定着部を有する場合には軸方向のひずみ分布は複雑であり、各測定点を単純に直線で結ぶことは必ずしも適当ではないが、傾向を概念的に把握する目的でここでは測定点を直線で結んでいる。供試体No. 1の $1\delta y$ 時においては、途中定着部(c点)のひずみおよび途中定着部から10cm荷点側の位置(b点)のひずみがほぼ降伏ひずみとなっている。これは途中定着鉄筋の定着余長をとらなかったため、端部付近の定着が不十分で連続鉄筋の引張力分担割合が大きくなっていることを示すものである。途中定着を施さないとした場合の作用モーメントに対する鉄筋ひずみの分布は図中の破線で示す直線であるが、b点の測定値は40%程度大きい値を示している。なお、CFSをフープ方向に巻付けた供試体No. 3もほぼ同じ傾向である。一方、CFSを軸方向に貼付けた供試体No. 2はc点の連続鉄筋のひずみが低減され、またb点においても作用モーメントから求まるひずみと同程度あるいはそれ以下のひずみを示しており、CFSを軸方向に貼付けることにより鉄筋ひずみが大幅に低減されていることがわかる。

3. 無補強の途中定着部の破壊機構

供試体No. 1における変位と連続鉄筋のひずみとの関係を図-7に示す。定着端部(c点)のひずみは $1.1\delta y$ 以降、中央部(a点)のひずみよりも大きな値を示し、また10cm荷点側の位置(b点)においては $1.7\delta y$ 以降、大きなひずみを示している。これより、連続鉄筋の広い範囲において大きな引張応力度が生じているものと推測される。

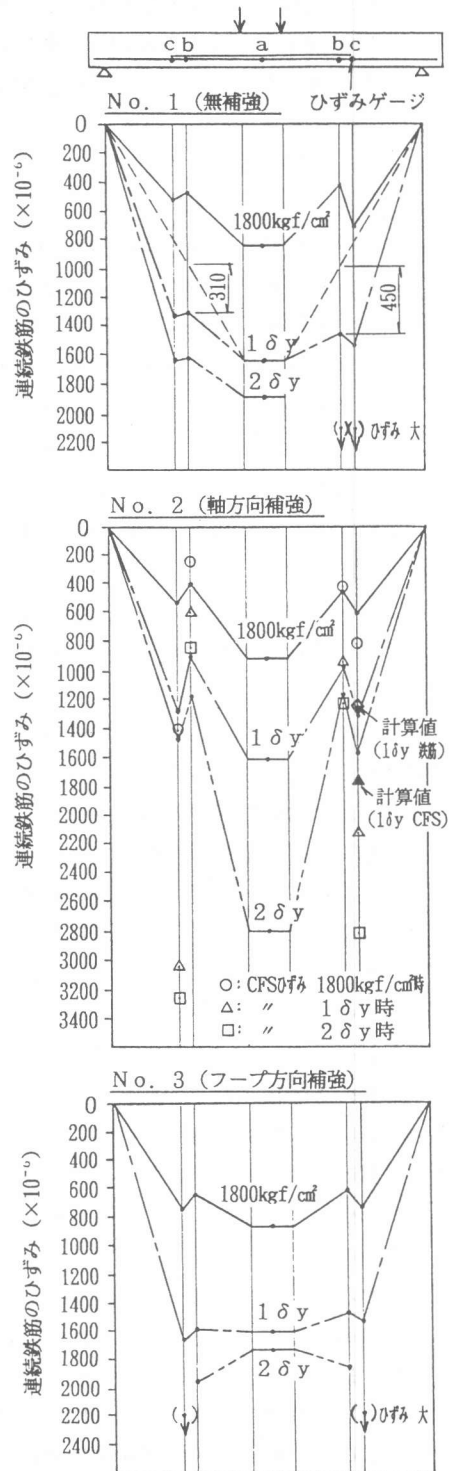


図-6 連続鉄筋のひずみ分布

b点、c点ともに両側の測定値を平均してひずみの状況を示すと図-8の通りとなる。1 δy 時のb点においては、途中定着鉄筋が受持つべきひずみのうち380 μ を連続鉄筋が余分に受持っている。ここで、途中定着鉄筋のひずみが定着端部を起点とする直線と仮定すると、定着端部からおおよそ15 ϕ の位置が連続鉄筋と途中定着鉄筋のひずみが同じとなる位置であり、山本ら[1]の試験結果とほぼ一致する。また図-7からわかるように

1.7 δy 程度でb点の連続鉄筋も降伏しており、この時の途中定着鉄筋が受持つひずみはさらに減少している(図-8のB点)。この点を通り途中定着鉄筋の1 δy 時に対して得られた直線と並行な直線を1.7 δy 時の途中定着鉄筋のひずみ分布であるとすれば、連続鉄筋と途中定着鉄筋のひずみが同じになるのは定着端部から22 ϕ の位置である。また、定着端部付近のおおよそ4 ϕ の範囲を付着切れの範囲とみなすことができる。

4. CFSによる補強効果の検討

供試体No. 2の定着端部において、1 δy 時の荷重 $P=4.6$ tfに対してCFSを鉄筋に置換えて平面保持および力の釣合い条件より連続鉄筋の応力度を計算した場合、図-6中に示すごとくほぼ測定結果に一致する。したがって定着端部の連続鉄筋の応力度は、CFSを鉄筋に置換えて計算することにより求めることができると考えられる。

一方、途中定着部については途中定着鉄筋の挙動を踏まえてCFSの効果を検討する必要がある。b点の連続鉄筋に作用するひずみは作用モーメントから計算されるひずみにほぼ一致しており、CFSを配置することにより途中定着鉄筋において不足するひずみを補っている。ここで、定着端部から20 ϕ の位置まで途中定着鉄筋のひずみが直線的に変化することとし、このひずみと作用モーメントから計算されるひずみとの差から途中定着鉄筋の不足引張力を求める。またCFSの平均

付着応力度を13kgf/cm²[2]とし、各断面から定着端部までの付着抵抗面積との積から最大付着抵抗力を求め、不足引張力との関係を示すと図-9のようになる。これより、定着端部から8 ϕ (=10cm)の範囲では途中定着鉄筋の不足引張力の方が大きくなり、連続鉄筋が受持つ引張力が増加しているものと考えられる。したがって、途中定着鉄筋の不足引張力がCFSの最大付着抵

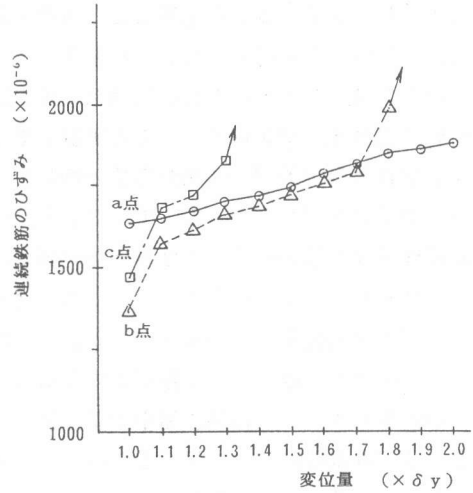


図-7 変位・ひずみ関係(供試体No. 1)

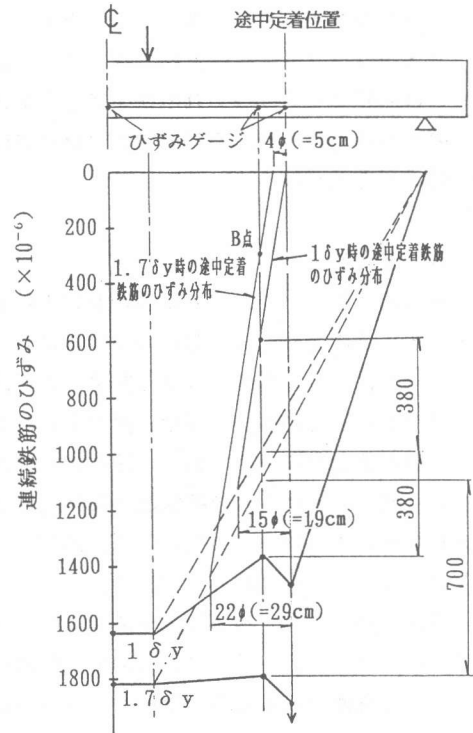


図-8 途中定着部における連続鉄筋のひずみ(供試体No. 1)

抗力より大きくなるこの範囲における連続鉄筋が降伏しないことを検討する必要がある。

以下では、CFSによる補強効果の検討方法について述べる。供試体No. 1の実験結果から、途中定着部の付着切れ範囲が変位の増加にともない広がることが明らかとなっている。したがって、既設構造物の補強に当っては端部の付着切れが生じているものとして考えることとする。付着切れの位置は実験結果(1.7 δy で4 ϕ)や正負繰返し等の影響を考慮し、10 ϕ 程度とすることが望ましいと考える。その結果、途中定着鉄筋の不足引張力は10 ϕ 位置において最大となり、この不足引張力から付着抵抗力を差し引いた引張力が加算されても連続鉄筋が降伏しない場合においてCFSによる補強効果が期待できるものとする。なお、CFSをフープ方向に巻付けて補強する場合、CFSは曲げせん断ひびわれの発生後から抵抗するものであり、そのせん断耐荷機構は既往の研究[2]と同様に考えればよい。

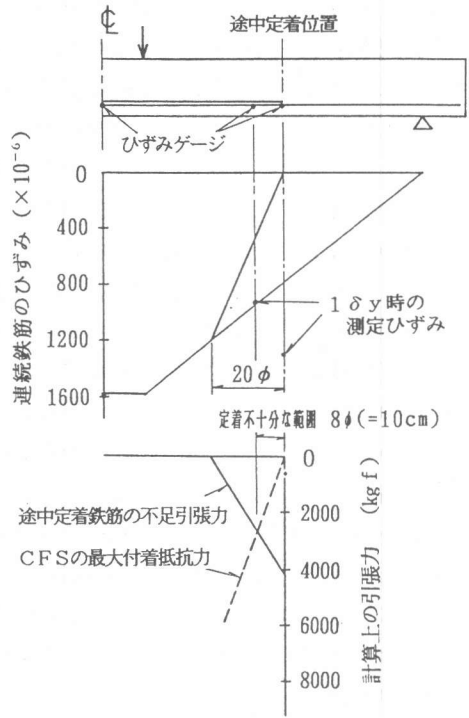


図-9 途中定着鉄筋の不足引張力およびCFSの最大付着抵抗力 (供試体No. 2)

5. まとめ

本研究より明らかとなった事柄を以下にまとめて示す。

- ① 必要な定着余長を持たない途中定着においては、定着端部付近の広い範囲の連続鉄筋が降伏するため、これが脆性的なせん断破壊の原因となり得る。
- ② CFSによる軸方向補強は、途中定着部の連続鉄筋の応力度を低減し曲げせん断ひびわれへの進展を抑制する。すなわち、途中定着鉄筋が受持つことのできない引張力をCFSの付着抵抗力で補うことにより連続鉄筋の降伏を抑制する。
- ③ CFSによるフープ方向補強は、曲げせん断ひびわれが発生した後から効果が発揮される。
- ④ 定着端部の連続鉄筋の応力度は、CFSを鉄筋に置換えて計算することにより求まる。そこで補強に当っては、連続鉄筋の降伏を防ぐだけのCFSを計算により求め、軸方向に貼付ければよい。ただし、一方でCFSの最大付着抵抗力について検討し、付着抵抗力が必ずしも十分でない判断される場合には、フープ方向補強によるせん断破壊の抑制に期待することになる。

[謝辞]

本研究の実施に当たり、飯田寛之氏(建設省土木研究所)、森下豊枝官ならびに4年生の佐藤正治君、藤原誠君、森美諭君には多大な協力を頂いた。ここに、感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 山本 強ほか: 鉄筋を途中定着した橋脚の耐震性能に関する実験的研究、土木学会論文集、第348号, pp.61-70, 1984.8
- 2) 宇治公隆: シート状連続炭素繊維補強材を用いた既設鉄筋コンクリート部材のせん断耐力向上効果に関する研究、コンクリート工学論文集、第3巻2号, pp.37-47, 1992.7